

文章编号:1673-2049(2019)05-0011-10

郑州粉土基坑开挖对下卧地铁隧道的影响

郭院成^{1,2}, 詹景元¹, 杜浩鸣³, 李明宇^{1,2}, 靳军伟^{1,2}, 孟 潮¹

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 地下工程安全与质量控制河南省工程实验室, 河南 郑州 450001; 3. 河南省交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 450052)

摘要:针对基坑开挖导致正在服役的下卧地铁隧道产生隆起变形而影响地铁运营安全的问题,以郑州东区粉土土质情况下邻近地铁的基坑工程为案例进行研究。通过室内土工试验得到了郑州粉土的相关具体力学参数取值,并建立了基坑开挖对下卧服役地铁隧道影响的三维数值分析模型,分析了基坑开挖对下卧地铁隧道的位移影响。结果表明:基坑开挖对下卧地铁隧道竖向位移的影响远大于对水平位移的影响;郑州东区粉土土质条件下的基坑开挖对下卧隧道竖向位移的影响要远小于上海黏土土质在经历相同基坑开挖工况下产生的对隧道竖向位移的影响;使用常规分层开挖方法进行基坑开挖引起的隧道竖向最大位移值超过了郑州地铁保护标准;采用提出的施作抗拔桩并分块开挖及时堆载的方案能大幅度减小基坑开挖对下卧服役地铁隧道竖向上浮量的影响;研究成果对郑州粉土地区基坑开挖条件下的下卧服役地铁隧道保护具有指导意义。

关键词:地铁隧道;变形;粉土;基坑开挖;竖向位移;数值分析

中图分类号: TU473 **文献标志码:** A

Influence of Excavation of Zhengzhou Silt Foundation Pit on Underlying Subway Tunnel

GUO Yuan-cheng^{1,2}, ZHAN Jing-yuan¹, DU Hao-ming³, LI Ming-yu^{1,2},
JIN Jun-wei^{1,2}, MENG Chao¹

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China; 2. Laboratory of Underground Engineering Safety and Quality Control of Henan Province, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China; 3. Henan Provincial Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450052, Henan, China)

Abstract: The excavation of foundation pit could cause the uplift deformation of underlying subway tunnel in service, which would affect the operation safety of subway. Taking the foundation pit near subway as specific engineering case under the condition of silt soil in Zhengzhou East District, the specific mechanical parameters of Zhengzhou silt were obtained through indoor geotechnical experiments, and a three-dimensional numerical analysis model for the influence of foundation pit excavation on underlying subway tunnel was established. Then the influence of foundation pit excavation on the displacement of underlying subway tunnel was analyzed. The results show that the influence of foundation pit excavation on the vertical displacement of underlying subway tunnel is much greater than the impact on horizontal displacement. Compared with the condition of Shanghai soft soil, at the same excavation

收稿日期:2018-12-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51508520)

作者简介:郭院成(1965-),男,河南辉县人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:guoyuancheng@163.com。

conditions, the vertical displacement of underlying subway tunnel which is caused by excavation of foundation pit under the condition of Zhengzhou silt soil is much less. The vertical maximum displacement of tunnel caused by pit excavation using conventional layered excavation method exceeds the subway protection standard of Zhengzhou. The foundation pit excavation using the scheme proposed through the methods of combining construction of uplift piles, block excavation and timely loading can greatly reduce the influence on the vertical displacement of underlying subway tunnel in service. The research results have guiding significance for the protection of underlying subway tunnel under the conditions of foundation pit excavation in Zhengzhou silt district.

Key words: subway tunnel; deformation; silt soil; excavation of foundation pit; vertical displacement; numerical analysis

0 引言

近年来中国沿海及中西部经济较发达地区城市地铁发展迅猛,截至 2017 年底中国内地地铁交通总运营里程已经超过 5 000 km^[1-3]。既有服役地铁隧道上方基坑开挖工程出现频率越来越高,而基坑的开挖会引起坑底土体发生卸荷回弹,从而导致下卧运营地铁隧道发生隆起变形,对服役地铁隧道的安全性和稳定性能产生威胁,影响地铁的正常运营。

针对上述问题,很多国内外学者主要采用了 3 种方法进行研究。理论推导:姜兆华等^[4-7]根据二阶段法,先计算出基坑开挖作用在隧道上的附加应力,再根据 Winkler 地基模型求出隧道纵向变形的解析解;姜峥^[8]通过分析附加应力法的不足,利用基坑开挖引起的土体附加变形计算出了地下管线的变形和内力。数值模拟:Shi 等^[9-16]通过数值模拟手段对基坑开挖的不同工况进行建模,分析不同工况下隧道产生的变形,以及不同的加固手段(包括分块开挖、施作抗拔桩、堆载压重等)对控制隧道位移的效果。试验研究:梁发云等^[17-22]采用现场监测、离心模型试验、室内模型试验的方法对基坑开挖情况下邻近隧道的受力和变形进行研究。

不同地区的土质情况有很大差别,目前针对该问题的研究主要集中在东南沿海软土地区,郑州粉土地区在基坑开挖对下卧服役地铁隧道的影

生的影响,并提出了合理可行的加固开挖方案。

1 数值分析建模方法

1.1 工程概况

本基坑工程位于郑州市郑州东区,为郑州 107 辅道快速化工程郑州东区的隧道施工段,该隧道段采用明挖法施工。隧道起始里程为 K10+848.847,终点里程为 K13+627.000,全长 2 778.153 m。隧道在里程为 K12+088.400~K12+128.100 的范围内,上跨穿越已经投入运营正在使用的郑州轨道交通 1 号线博学路站至郑州东站的盾构区间段。基坑为南北走向,地铁为东西走向,两者平面基本正交。基坑与服役隧道的位置关系如图 1 所示。

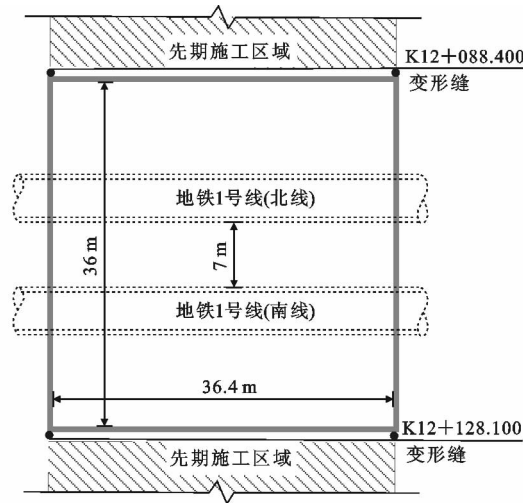


图 1 基坑与服役隧道位置

Fig. 1 Position of Foundation Pit and Tunnel in Service

基坑南北方向上的长度为 36 m,东西方向上的长度为 36.4 m,深度为 6.55 m。服役隧道的顶部与基坑底部之间的距离为 5 m,盾构隧道管片的外径为 6.0 m,内径为 5.4 m,衬砌厚度为 0.3 m,隧道

本文依托郑州东区某邻近地铁的基坑工程,根据三轴试验确定郑州粉土力学参数,采用三维数值模拟分析软件,研究了基坑开挖对下卧地铁隧道产

中心埋深为 14.55 m。地铁隧道南线和北线间距为 13.0 m,净间距为 7.0 m。

1.2 郑州粉土力学参数的测定

本试验用土取自郑州东区基坑的施工现场,取土深度为地下 15 m 左右,通过含水率试验和密度试验得到该粉土的平均含水率为 33.0%,平均密度为 $1.98\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,干密度 ρ_d 为 $1.49\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,土样的初始孔隙比 e_0 为 0.81。

对取得的郑州粉土进行三轴等压固结不排水剪切试验,以得到修正剑桥模型中临界状态有效应力比 M 的值。试验分 3 组进行,试验采用的固结应力如表 1 所示。

表 1 三轴等压固结不排水剪切试验固结应力

Tab.1 Three-axis Isobaric Consolidated Undrained Shear Test Consolidation Stress

固结模式	等压固结		
试验编号	CU-1	CU-2	CU-3
固结应力/kPa	100	200	300

根据试验结果绘出了三轴应力路径曲线,如图 2 所示,从而得到了粉土的修正剑桥模型中临界状态有效应力比 M 的值为 1.414。

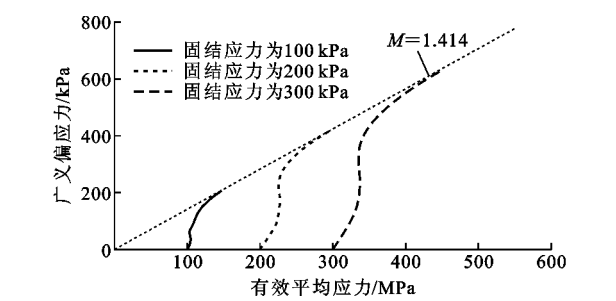


图 2 三轴试验应力路径

Fig. 2 Stress Path of Tri-axial Test

对取得的郑州粉土采用应变三轴仪进行各向等压固结回弹试验,以得到修正剑桥模型中塑性对数体积模量 λ 和弹性对数体积模量 κ 的值。根据试验过程中排水体积的变化,计算得到了各级固结压力作用下粉土试样比体积 v 的变化值,试验结果如表 2 所示。

根据试验结果进行线性拟合,如图 3 所示,其中 p' 为土的有效平均应力。根据压缩曲线的斜率得到塑性对数体积模量 λ 的值为 0.066 2,根据回弹曲线的斜率得到弹性对数体积模量 κ 的值为 0.004 2。

1.3 数值分析模型的建立

以本文上述实际基坑工程为背景,建立三维有限元数值分析模型,模型简图如图 4 所示。基坑周边有支护桩进行支护,支护桩的长度为 18.9 m。根

表 2 各向等压固结回弹试验结果

Tab.2 Results of Various Isobaric Consolidation Rebound Test

固结压力/kPa	比体积 v	
	压缩	回弹
0	1.81	
100	1.63	1.559 6
200	1.58	1.556 9
300	1.55	

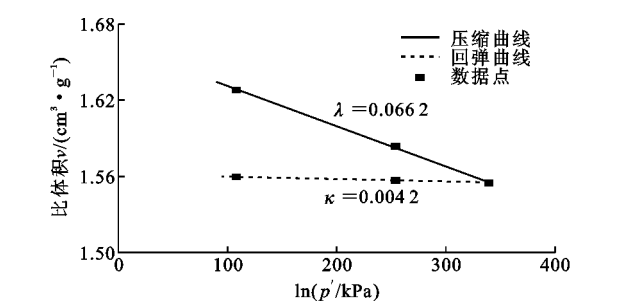


图 3 比体积-固结应力拟合曲线

Fig. 3 Fitting Curves of Specific Volume-consolidation Stress

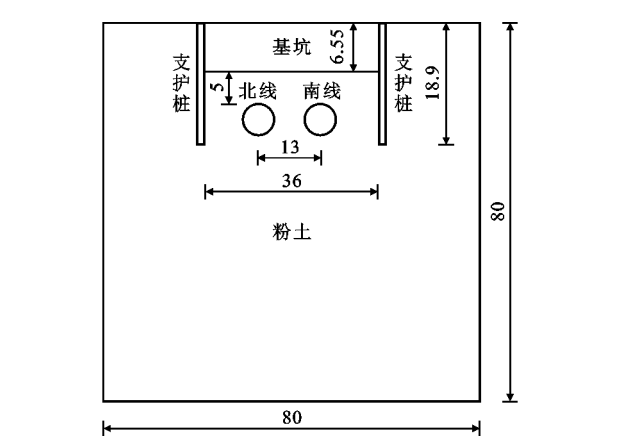


图 4 数值分析模型简图(单位:m)

Fig. 4 Diagram of Numerical Analysis Model (Unit:m)

据前人的研究成果,基坑周边 3 倍~4 倍基坑深度范围以外的土体受到基坑施工的扰动较小,同时,由于本基坑工程纵向和横向的尺寸差别不大,因此基坑纵向和横向的分析模型长度都取为 80 m(约为基坑深度的 4 倍)。模型在竖直方向上的长度同时也取为 80 m,有限元分析模型如图 5 所示。

在有限元模型中,模型的边界条件设定为:前后设置 X 方向上的位移,左右面设置 Y 方向上的位移,底部设置 Z 方向上的位移。

在实际工程中采用的支护结构形式为支护桩墙,由直径 850 mm 内插型钢的 SMW 工法桩构成,其桩间距为 600 mm。在模拟中为了简化计算,将支护桩墙简化为地下连续墙进行模拟分析,其弹性

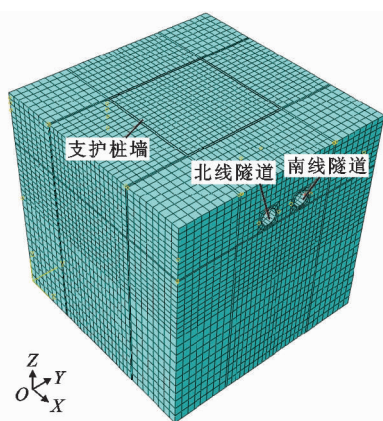


图 5 有限元分析模型

Fig. 5 Finite Element Analysis Model

模量取为 $E=24 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu=0.2$, 重度 $\gamma=25 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, 其简化准则为刚度相等的原则, 即单根桩等效为地下连续墙时, 令等价后的地下墙厚度为 h , 按照二者抗弯刚度相等的原则进行简化, 如式 (1) 所示

$$E_q I_q = E_z I_z \quad (1)$$

式中: E_q 为墙体的弹性模量; I_q 为墙体的惯性矩; E_z 为桩的弹性模量; I_z 为桩的惯性矩。

由于在模拟中地下连续墙的弹性模量取值与实际工程中桩的弹性模量相同, 因此, 地下连续墙的惯性矩应与桩的惯性矩保持一致。取图 6 阴影部分的 1 个计算单元进行计算, 使得地下连续墙对 Y 轴的惯性矩等于阴影部分关于 Y 轴的惯性矩, 从而得到等效地下连续墙厚度 h 的取值为 780 mm 。

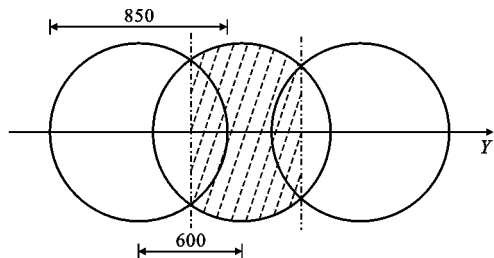


图 6 计算单元示意图 (单位: mm)

Fig. 6 Diagram of Calculation Unit (Unit: mm)

将支护桩墙简化为地下连续墙之后, 地下连续墙的深度取为实际工程中支护桩墙的深度 18.9 m , 地下连续墙与土体之间的接触面采用面接触的相互作用形式, 接触面的法向行为符合硬接触模式, 切向行为服从库仑摩擦模型, 地下连续墙与土体之间的摩擦因数参考文献[23]取为 0.35 。

土体按照均质单一粉土进行设置, 土体本构模型采用修正剑桥模型, 土体具体参数为: 土体重度取 $\gamma=19.8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, 初始孔隙比 e_0 为 0.81 , 泊松比 ν

为 0.3 , 塑性对数体积模量 λ 和临界状态有效应力比 M 按照室内三轴试验的结果分别取为 0.0662 和 1.414 。基坑工程与隧道工程对应的土体剪切应变处于小应变范围内, 小应变剪切刚度大约是常规三轴试验得出的土体剪切刚度的 1.5 倍~ 2.5 倍, 参考文献[24]给出的方法, 将弹性对数体积模量 κ 的值进行修正, 折减为室内三轴试验测得值的 $1/2$, 得到 κ 的取值为 0.0021 。

隧道衬砌和支护结构都采用线弹性本构。由于郑州地铁 1 号线盾构隧道管片采用的混凝土等级为 C60, 因此隧道衬砌的弹性模量取值为 $E=36 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu=0.2$, 重度 $\gamma=27 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ 。隧道与土体接触面的设置采用面接触的相互作用形式, 接触面的法向行为采用硬接触模式, 接触面的切向行为符合 Coulomb 定律, 隧道与粉土之间的摩擦因数参考文献[23]取为 0.35 。

2 数值模拟结果分析

本文采用 ABAQUS 数值模拟软件进行基坑开挖对下卧隧道的影响分析, 通过在 Step 分析步模块中创建不同的分析步来实现现实中施工工况的再现。对于基坑开挖工况的模拟, 通常利用 ABAQUS 中的生死单元技术, 使用 Remove 语句移除需要开挖的土体。

基坑开挖采用常规分层开挖的方式进行模拟, 基坑总深度为 6.55 m , 分为 3 步开挖。第 1 步开挖至深度 2 m 处, 第 2 步开挖至深度 4 m 处, 第 3 步开挖至基坑底部, 深度 6.55 m 处。

在第 1 步开挖模拟中, 采用生死单元技术移除基坑开挖至地表面以下 2 m 范围内的土体单元; 第 2 步开挖模拟中移除 $2 \sim 4 \text{ m}$ 范围内的土体单元; 第 3 步开挖模拟中移除 4 m 至基底 6.55 m 深度范围内的土体单元。

2.1 隧道的竖向位移

基坑开挖完成时, 提取基坑下卧地铁隧道的竖向位移云图, 如图 7 所示。从地铁隧道的竖向位移云图中可以看出, 南北线隧道的竖向位移变化规律相似。沿隧道纵向方向, 隧道的竖向位移最大值都发生在基坑中心处。提取基坑中心截面处的隧道竖向位移矢量图, 如图 8 所示, 可以看出沿隧道横向方向, 隧道的竖向位移最大值发生在隧道顶部, 从隧道顶部到底部, 其竖向位移值逐渐减小。

由于南北线竖向位移的变化规律基本相似, 因此, 以南线隧道为例, 沿隧道纵向方向提取基坑开挖

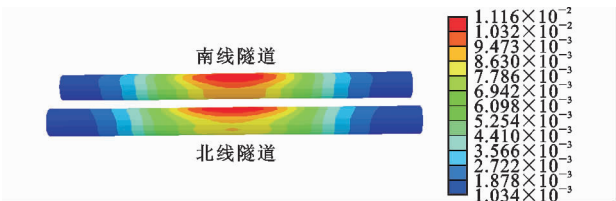


图 7 隧道竖向位移云图(单位:m)

Fig. 7 Vertical Displacement Cloud Diagram of Tunnel (Unit:m)

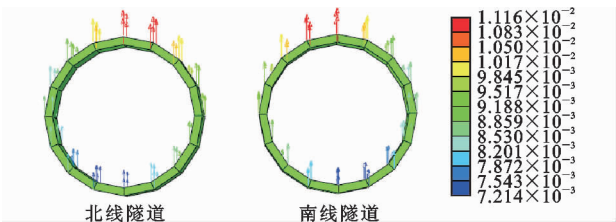


图 8 基坑中心截面隧道竖向位移矢量图(单位:m)

Fig. 8 Vertical Displacement Vector Graph of Tunnel in Foundation Pit Center Section (Unit:m)

到不同深度时的隧道顶部竖向位移,如图 9 所示。从图 9 可知,隧道顶部的竖向位移在基坑开挖完成时达到了最大值 11.16 mm,同时,随着开挖深度的增大,隧道顶部的竖向位移随之增大。提取基坑开挖至 2,4,6.55 m 处时隧道顶部的竖向最大位移值,并分析其增长速率,如图 10 所示。从图 10 可以看出,随着基坑开挖的分步进行,隧道顶部的竖向位移增加速率逐渐变大。

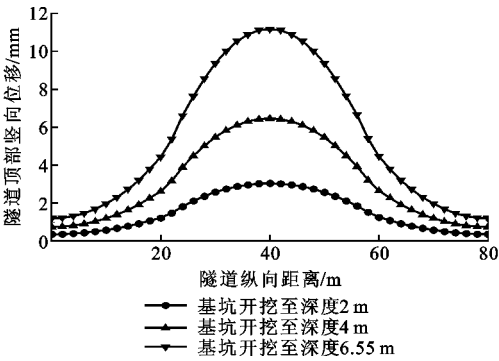


图 9 南线隧道顶部竖向位移变化 1

Fig. 9 Vertical Displacement Changes at Top of South Line Tunnel 1

2.2 隧道的水平位移

当基坑开挖完成时,通过选取基坑中心处的南北线隧道截面来分析隧道的水平位移。以隧道截面的顶部为起点 1,沿顺时针方向分别定义点 2~17,如图 11 所示得到了南北两线隧道截面 17 个点的水平位移随着基坑开挖分步进行的变化,结果见图 12。

由图 12 可知,北线隧道的最大水平位移点在隧

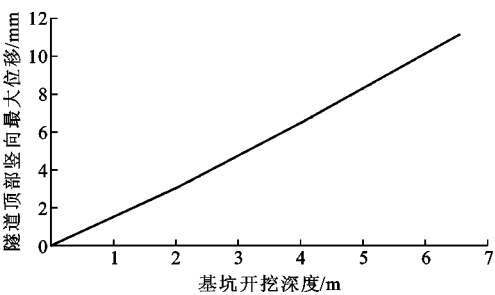


图 10 隧道顶部竖向最大位移值变化

Fig. 10 Maximum Value Change of Vertical Displacement at Top of Tunnel

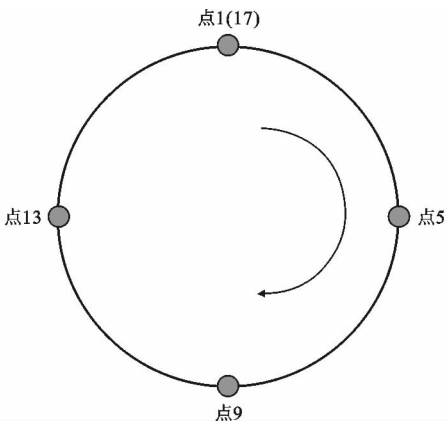
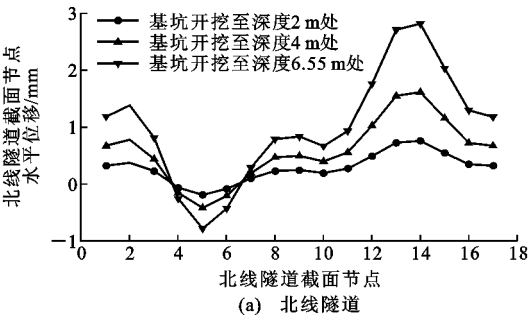
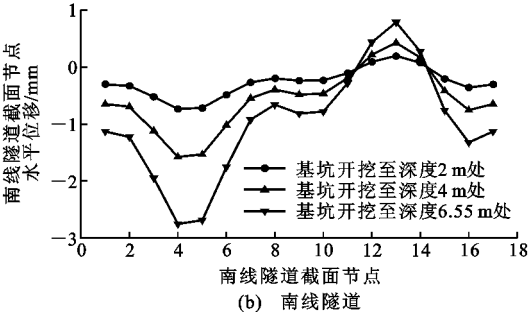


图 11 隧道截面节点示意图

Fig. 11 Diagram of Tunnel Section Nodes



(a) 北线隧道



(b) 南线隧道

图 12 隧道截面节点的水平位移

Fig. 12 Horizontal Displacements of Tunnel Section Nodes

道截面的右上部,而南线隧道的最大水平位移点在隧道截面的右上部。隧道的最大水平位移值为

2.81 mm,总体来说,隧道的水平位移值较小,当基坑开挖结束时,隧道整体向基坑中心靠拢。

2.3 相同基坑开挖工况下单双线隧道的竖向位移对比

从前面分析中可以看出,基坑开挖对下卧隧道竖向位移的影响远大于对水平位移的影响。在已有的分析基坑开挖对下卧双线隧道影响的有限元模型基础上重新建模,分析基坑开挖对下卧单线隧道竖向位移的影响,并与双线隧道进行比较,结果如图 13 所示。

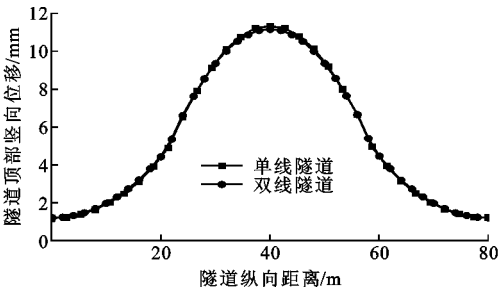


图 13 基坑开挖对单双线隧道的竖向位移影响对比
Fig. 13 Comparison of Influence of Foundation Pit Excavation on Vertical Displacement Between Single and Double Line Tunnels

由图 13 中的隧道顶部竖向位移变化曲线可以得到,在相同的基坑开挖工况下,当基坑开挖结束时,单线隧道的顶部竖向位移最大值要大于双线隧道的顶部竖向位移最大值,但在隧道的纵向方向上,其顶部竖向位移的发展趋势基本一致。

2.4 不同土质相同基坑开挖工况下竖向位移对比

目前上海地区已经完成了多例在已服役运营地铁上方进行基坑开挖的工程案例,积累了丰富的工程经验和控制隧道变形的研究成果。将郑州粉土土质情况下的上跨运营地铁隧道基坑开挖情况与上海黏土土质情况下的相同工况作对比,有利于更好地评估郑州粉土土质性能,提出控制隧道变形的方案。因此,在单线隧道数值模拟的模型基础上,通过改变土体参数,来实现郑州粉土与上海黏土相同工况下的对比。上海黏土的土体参数参考文献[25],将上海黏土的参数取值与郑州东区粉土的参数取值进行对比,如表 3 所示,隧道顶部竖向位移对比结果如图 14 所示,隧道截面节点的水平位移对比结果见图 15。

从图 14,15 中可以看出,上海地区的隧道顶部竖向位移和隧道截面的水平位移均远大于相同基坑开挖工况下郑州东区粉土地区的隧道位移。郑州东区粉土土质下隧道顶部的最大竖向位移为 11.32 mm,而上海黏土土质其最大竖向位移达到了 33.68

表 3 上海黏土与郑州东区粉土参数取值对比
Tab. 3 Comparison of Values of Silt Parameters Between Shanghai Clay and Zhengzhou East District Silt Soil

土质	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	ν	λ	κ	M	e_0
上海黏土	18.25	0.35	0.108 1	0.009 0	1.290	1.03
郑州粉土	19.80	0.30	0.066 2	0.002 1	1.414	0.81

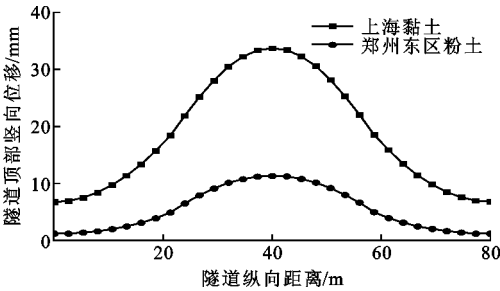


图 14 不同土质情况下隧道顶部竖向位移
Fig. 14 Vertical Displacement at Top of Tunnel Under Different Soil Conditions

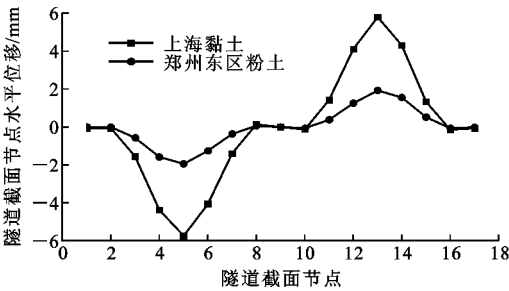


图 15 不同土质情况下隧道截面节点的水平位移
Fig. 15 Horizontal Displacement of Tunnel Section Nodes Under Different Soil Conditions

mm,近似为前者的 3 倍;郑州粉土土质情况下隧道截面的最大水平位移仅为 1.92 mm,而相同工况下上海黏土土质其值达到了 5.79 mm,也远大于前者。从对比结果可以看出,郑州东区粉土的土质情况相对于上海黏土的土质情况要好,对下卧地铁隧道变形产生的影响也相对较小,可以结合地域的施工特色,从施工经济方便的角度来减小基坑开挖对下卧服役地铁隧道的变形影响。

3 加固开挖方案有效性分析

从前文的数值模拟分析结果可以计算得到基坑常规分层开挖对下卧服役地铁隧道变形的影响。隧道的绝对最大位移为隧道顶部竖向最大位移 11.16 mm,超出了郑州市地铁隧道保护的标准(10 mm)。隧道的竖向相对变形为 3.84 mm,水平相对变形为 3.49 mm,隧道的变形曲率半径经计算为 98 765 m,隧道的相对弯曲为 1/4 944,均满足规范要求。因此,应该采用加固方案控制基坑开挖对下卧服役地

铁隧道竖向位移的影响。

3.1 加固开挖方案

目前常用的控制隧道上浮变形的措施有:坑内外土体加固,设置封堵墙,坑底设置抗拔桩墙,上跨基坑分块开挖,及时堆载封底,减小基坑底部暴露时间等。结合郑州的区域施工特色,从施工经济方便的角度考虑,选取施作抗拔桩墙并分块开挖及时堆载的复合加固开挖方案对上跨隧道的基坑进行开挖。

抗拔桩墙具体布设方案为:在南北两线隧道的两侧分别设置抗拔桩墙,共设置 3 道。第 1 道抗拔桩墙设置在北线隧道北侧 3 m 处,第 2 道抗拔桩墙设置在南北线隧道的中间位置处,第 3 道抗拔桩墙设置在南线隧道的南侧 3 m 处,抗拔桩墙的平面、立面示意图如图 16 所示。

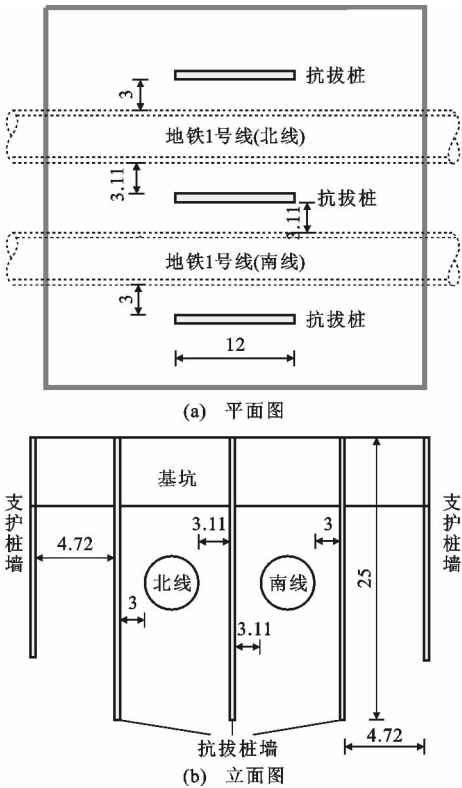


图 16 抗拔桩墙布置示意图(单位:m)

Fig. 16 Diagram of Uplift Pile Wall Layout (Unit:m)

分块开挖并及时堆载的具体施工方案为:结合基坑的实际尺寸,沿隧道纵向方向将基坑分为等长的 12 m 三大块土体,中间部分的土体按照 1:1 的比例进行放坡开挖,如图 17 所示。首先,先开挖基坑中间部分的土体至深度 2 m 处;再开挖中间部分的土体至深度 4 m 处;开挖中间部分的土体至基底 6.55 m 处;随后施作 1.0 m 厚的结构底板并进行堆载,并将基坑左右两侧的土体对称开挖至深度 2 m

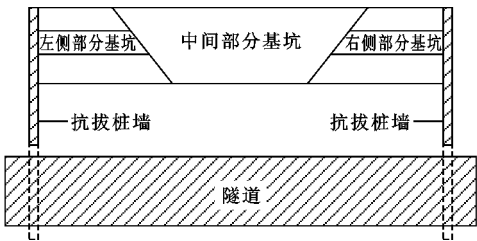


图 17 基坑分块开挖示意图

Fig. 17 Diagram of Foundation Pit Part-excavation

处,再开挖至深度 4 m 处,最后将基坑左右两侧的土体对称开挖至基底 6.55 m 处。

3.2 数值模拟参数选取

数值模拟的相关参数选取参见第 1.3 节。施作的结构底板平面尺寸为 12 m×36 m,厚度为 1.0 m,结构底板采用 C40 钢筋混凝土板。在数值模拟过程中按照结构底板的实际尺寸,采用弹性模量 $E=32.5\text{ GPa}$ 、泊松比 $\nu=0.2$ 的均质弹性体来进行模拟。实际施工过程中采用混凝土配重块的方式进行堆载,在 ABAQUS 数值模拟中采用 15 kPa 的均布荷载作用于结构底板的上表面对实际堆载效果进行模拟。

抗拔桩墙的施作工法、抗拔桩桩径以及桩间距与支护桩墙的设置保持一致,因此模拟中抗拔桩墙与支护桩墙的简化方式相同,等效为地下连续墙进行分析。按照弹性模量 $E=24\text{ GPa}$ 、泊松比 $\nu=0.2$ 的均质线弹性体考虑,长度设为 25 m,宽度为 12 m,深度为 25 m,按照抗弯刚度等效的原则,抗拔桩墙等效为地下连续墙的厚度换算为 780 mm。抗拔桩墙与土体的接触面设置与本文第 1.3 节中的支护桩墙与土体之间的接触面设置保持一致。

3.3 加固开挖方案结果分析

对采取加固开挖方案施工之后的隧道结果进行分析,发现南北线隧道竖向位移的变化趋势基本一致,隧道顶部的竖向位移明显大于隧道其他位置处的位移,因此,取南线隧道的顶部位移进行分析,研究加固开挖方案对控制隧道上浮变形的效果。

图 18 为基坑开挖分步进行时南线隧道的顶部竖向位移变化。从图 18 中可以看出:在基坑左右两部分土体未开挖的情况下,随着中间部分土体开挖深度的增加,隧道顶部的竖向位移逐渐增大;当基坑中间部分的土体开挖至基底之后,进行结构底板的施作并且进行堆载,明显降低了隧道顶部的竖向位移;随着两侧部分的土体继续开挖,隧道顶部的竖向位移逐渐增大。在基坑开挖的每步工况中,隧道顶部的竖向位移均没有超过规定的 10 mm 限制,当基

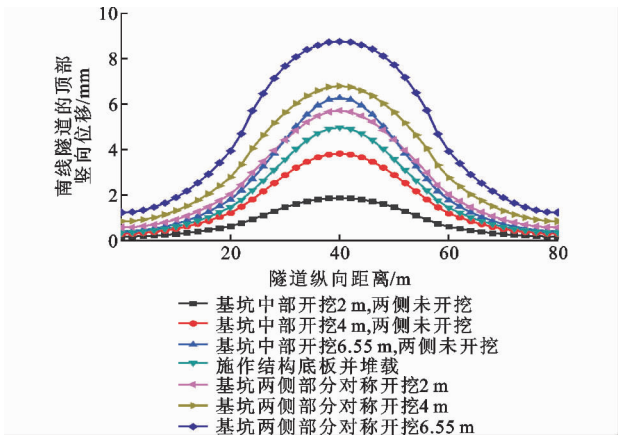


图 18 南线隧道顶部竖向位移变化 2

Fig. 18 Vertical Displacement Changes at Top of South Line Tunnel 2

坑开挖完成时,隧道顶部的竖向位移达到最大值。

采用常规方案与本文提出的复合加固开挖方案进行基坑开挖,对比基坑开挖完成时引起的隧道顶部竖向位移,结果如图 19 所示。常规开挖引起的隧道顶部竖向位移最大值达到 11.16 mm,而采用加固开挖方案引起的隧道顶部竖向位移最大值为 8.75 mm,相比前者减小了 21.6%,并且隧道顶部竖向位移最大值在郑州地铁保护规定的允许值以内,可见该加固开挖方案对控制隧道的竖向上浮变形是有效的。

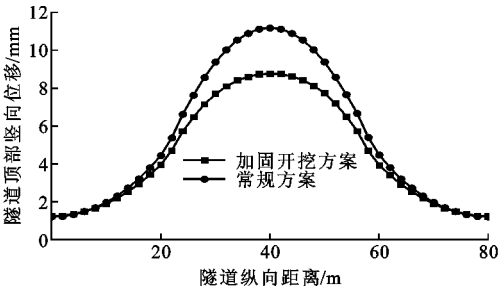


图 19 常规方案与加固开挖方案引起的隧道顶部竖向位移

Fig. 19 Vertical Displacements at Top of Tunnel Caused by Conventional Scheme and Reinforcement Excavation Scheme

采用不同方案进行基坑开挖,当基坑开挖完成时,提取隧道截面节点的水平位移进行比较,隧道截面节点的选取参照本文第 2.2 节的方法,对比结果如图 20 所示。从图 20 中可以看出,采用常规方案进行开挖,隧道截面的最大水平位移点出现在隧道两侧拱腰的位置,而当采用加固开挖方案进行时,隧道截面的水平最大位移点出现在隧道两侧拱腰偏上的位置。同时,相比于常规开挖方案引起的隧道截面水平位移最大值 2.81 mm,加固开挖方案引起的

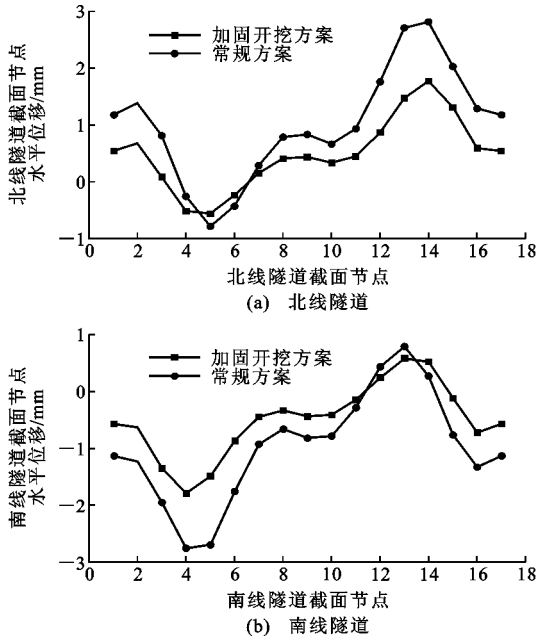


图 20 常规方案与加固开挖方案引起的隧道截面节点水平位移

Fig. 20 Horizontal Displacements of Tunnel Section Nodes Caused by Conventional Scheme and Reinforcement Excavation Scheme

隧道截面水平位移最大值仅为 1.79 mm,最大值降低了 36.3%。因此,该加固开挖方案对降低基坑开挖对下卧服役隧道的水平位移也有显著效果。

当采用本文提出的加固开挖方案进行基坑开挖时,其引起的下卧服役地铁隧道绝对最大位移为隧道中心截面的顶部竖向位移 8.75 mm,在郑州地铁控制标准要求(10 mm)范围内;隧道的竖向相对变形为 2.73 mm,水平向相对变形为 2.31 mm,均满足要求;隧道的变形曲率半径经过计算为 128 205 m,相对弯曲为 1/6 410,也在标准要求的范围内。同时,相比常规方案,采用加固开挖方案开挖引起的隧道竖向最大位移和水平最大位移均有明显减小,给下卧地铁隧道提供了更多的安全储备。因此,采用本文提出的加固开挖方案进行基坑开挖对控制隧道的位移是有效的。

4 结 语

(1)基坑开挖对下卧地铁隧道竖向位移的影响远大于对水平位移的影响。

(2)相同基坑开挖工况下,相比上海黏土土质,郑州东区粉土土质条件下的基坑开挖对下卧隧道竖向位移的影响要远小于前者。

(3)结合具体的郑州东区基坑案例,通过数值模拟分析得到,使用常规开挖方法进行开挖,其引起的

隧道竖向上浮最大值超过地铁保护标准,需要采取合理措施控制隧道的竖向位移。

(4)针对郑州东区基坑案例提出的采用施作抗拔桩并分块开挖及时堆载的方案经验证是有效的,大幅降低了基坑开挖引起的下卧地铁隧道竖向位移。

参考文献:

References:

- [1] 顾 岷. 我国城市轨道交通发展现状与展望[J]. 中国铁路, 2011(10): 53-56.
GU Min. The Development Status and Prospect of Urban Rail Transit in China[J]. Chinese Railway, 2011(10): 53-56.
- [2] 智研咨询集团. 2016—2022 年中国城市轨道交通市场运行态势及投资战略研究报告[R]. 北京: 智研咨询集团, 2016.
Zhiyan Consulting Group. Research Report on the Operation Situation and Investment Strategy of China's Urban Rail Transit Market in 2016—2022 [R]. Beijing: Zhiyan Consulting Group, 2016.
- [3] 中国城市轨道交通协会. 2017 年中国内地城轨交通线路概况[R]. 北京: 中国城市轨道交通协会, 2018.
China Urban Traffic Rail Association. 2017 China Urban Rail Transit Line Overview [R]. Beijing: China Urban Traffic Rail Association, 2018.
- [4] 姜兆华, 张永兴. 基坑开挖对邻近隧道纵向位移影响的计算方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(1): 7-11, 39.
JIANG Zhao-hua, ZHANG Yong-xing. Calculation of Influence on Longitudinal Deformation of Adjacent Tunnels Due to Excavation[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(1): 7-11, 39.
- [5] KLAR A, VORSTER T E B, SOGA K, et al. Soil-pipe Interaction Due to Tunnelling: Comparison Between Winkler and Elastic Continuum Solutions [J]. Geotechnique, 2005, 55(6): 461-466.
- [6] 张治国, 黄茂松, 王卫东. 邻近开挖对既有软土隧道的影响[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1373-1380.
ZHANG Zhi-guo, HUANG Mao-song, WANG Wei-dong. Responses of Existing Tunnels Induced by Adjacent Excavation in Soft Soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1373-1380.
- [7] ZHANG Z G, HUANG M S, WANG W D. Evaluation of Deformation Response for Adjacent Tunnels Due to Soil Unloading in Excavation Engineering[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2013, 38: 244-253.
- [8] 姜 峥. 基坑开挖引起邻近管线变形的理论解析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(2): 362-368.
JIANG Zheng. Theoretical Analysis on Deformation of Pipeline Caused by Adjacent Foundation Pit Excavation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(2): 362-368.
- [9] SHI J W, NG C W W, CHEN Y H. Three-dimensional Numerical Parametric Study of the Influence of Basement Excavation on Existing Tunnel[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 63: 146-158.
- [10] LIANG R Z, WU W B, YU F, et al. Simplified Method for Evaluating Shield Tunnel Deformation Due to Adjacent Excavation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71: 94-105.
- [11] 郑 刚, 刘庆晨, 邓 旭. 基坑开挖对下卧运营地铁隧道影响的数值分析与变形控制研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1459-1468.
ZHENG Gang, LIU Qing-chen, DENG Xu. Numerical Analysis of Effect of Excavation on Underlying Existing Metro Tunnel and Deformation Control[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5): 1459-1468.
- [12] 徐长节, 王伊丽, 徐芄蕾, 等. 新建工程基坑开挖及结构施工对既建下卧隧道的影响研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3201-3209.
XU Chang-jie, WANG Yi-li, XU Yuan-lei, et al. Effect of Foundation Pit Excavation and Structural Construction of New Engineering on Existing Underlying Tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(11): 3201-3209.
- [13] 黄兆纬, 黄 信, 胡雪瀛, 等. 基坑开挖对既有地铁隧道变位影响及采取措施分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增2): 381-385.
HUANG Zhao-wei, HUANG Xin, HU Xue-ying, et al. Influence of Foundation Pit Excavation on Displacement of Existing Metro Tunnels and Technical Measures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 381-985.
- [14] 魏少伟, 张玉芳, 郑 刚. 基坑开挖对坑底已建隧道影响的三维数值分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(增): 112-116.
WEI Shao-wei, ZHANG Yu-fang, ZHENG Gang. Three Dimensional Numerical Investigation of the Influence of Basement Excavation on Underlying Tunnels[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(S): 112-116.
- [15] 黄宏伟, 黄 栩, HELMUT S F. 基坑开挖对下卧运营盾构隧道影响的数值模拟研究[J]. 土木工程学报,

- 2012,45(3):182-189.
- HUANG Hong-wei, HUANG Xu, HELMUT S F. Numerical Analysis of the Influence of Deep Excavation on Underneath Existing Road Tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(3):182-189.
- [16] 魏 纲, 蔡吕路, 陈 杰, 等. 不同的基坑开挖措施对既有隧道影响的研究[J]. 市政技术, 2014, 32(6): 122-125.
- WEI Gang, CAI LU-lu, CHEN Jie, et al. On the Influences of Different Measures of Foundation Pit Excavation on Existing Tunnel[J]. Municipal Engineering Technology, 2014, 32(6):122-125.
- [17] 梁发云, 褚 峰, 宋 著, 等. 紧邻地铁枢纽深基坑变形特性离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3):657-664.
- LIANG Fa-yun, CHU Feng, SONG Zhu, et al. Centrifugal Model Test Research on Deformation Behaviors of Deep Foundation Pit Adjacent to Metro Stations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3):657-664.
- [18] 姜兆华. 基坑开挖时邻近既有隧道的力学响应规律研究[D]. 重庆:重庆大学, 2013.
- JIANG Zhao-hua. Study of Mechanical Response on Adjacent Tunnel in Processes of Foundation Excavation[D]. Chongqing:Chongqing University, 2013.
- [19] 魏 纲. 基坑开挖对下方既有盾构隧道影响的实测与分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(5):1421-1428.
- WEI Gang. Measurement and Analysis of Impact of Foundation Pit Excavation on Below Existed Shield Tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5): 1421-1428.
- [20] 况龙川. 深基坑施工对地铁隧道的影响[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3):284-288.
- KUANG Long-chuan. Influence of Construction of Deep Foundation Pit on Tunnels of Metro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 284-288.
- [21] BURLAND J B. Small Is Beautiful — The Stiffness of Soils at Small Strains[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989, 26(4):499-516.
- [22] NG C W W, SHI J W, HONG Y. Three-dimensional Centrifuge Modelling of Basement Excavation Effects on an Existing Tunnel in Dry Sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(8):874-888.
- [23] 郭孝坤. 郑州地铁盾构下穿施工对既有建筑桩基承载力的影响研究[D]. 郑州:郑州大学, 2015.
- GUO Xiao-kun. Study on Effects of Shield Tunnelling Underneath Pile Foundation of Existing Building on Bearing Capacity in Zhengzhou [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2015.
- [24] GOH K H. Response of Ground and Buildings to Deep Excavations and Tunnelling [D]. Cambridge: University of Cambridge, 2011.
- [25] 徐中华. 上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状研究[D]. 上海:上海交通大学, 2007.
- XU Zhong-hua. Deformation Behavior of Deep Excavations Supported by Permanent Structure in Shanghai Soft Deposit [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007.